

ミスマッチ陰性電位と聴覚情報処理

玉越 勢治・八木 昭宏

1. はじめに

本稿における聴覚情報処理とは、気圧の変動が音波として人の聴覚器に達してから（感覚入力）、刺激に対して心理的、生理的な反応（出力）を示すまでの過程とする。聴覚情報処理の初期選択反応の大部分は不随意的に行われている。なぜならば、視覚系は網膜により情報入力を行うが、観察者が目を背ければ情報は入力されない。瞼を閉じればたちどころに暗闇を見ることが可能である。一方、耳には随意的に感覚遮断の機能をもつ瞼のような蓋は備わっていない。しかしながら、走行する電車の車内や、カクテルパーティー会場の雑踏の中で、不必要な雑音を遮断することが可能である。その結果として、ある程度の騒音下でも、興味深い隣人の話は聴取することが可能である。ヒトの聴覚系は入力情報を選択することが可能であると言える。このように処理対象を選択する機能を我々は「選択的注意」と呼ぶ。雑踏の中、騒音を気にせずに会話が可能となるのは対象者に選択的注意を向けているからである。しかし、我々は常に注意の矛先を選択しているわけではない。集中して課題に取り組んでも、外部からの刺激、例えば自分の名前を呼ばれると、我々は集中状態から脱し、首を振り向き、刺激の発生源に注意を定位する。興味深い点は、課題と関連していない刺激に対しても反応が可能であるということである。騒音下で会話している時に小銭の落下、着地音が耳に入ると思わず、注意は向けられる。

本稿ではこのような刺激駆動型の自動的な選択機能に関して、特に聴覚の自動的な注意機能の指標として用いられる脳波、及び事象関連電位を中心に解説

を行う。そして、聴覚情報処理の時間的側面についての最近の知見を解説する。

2. 脳波，事象関連電位

2.1. 脳波，事象関連電位について

人の頭皮に設置した探査電極と，耳朶（耳たぶ）や鼻の先端に設置した基準電極との電位差（電圧）を計測すると，数ナノボルトから，数ミリボルトの電位変動が記録される。電位変動は陽性，陰性へと不規則かつリズミカルに変動し，時系列に波を描く。観察された電位変動が脳電図（**EEG：electroencephalogram**），あるいは我々がしばしば日常会話で用いる，脳波と呼ばれるものである。

頭皮上で観察される脳波の電源は，大脳皮質を構成する様々な神経細胞のうち，皮質表面に樹状突起を伸ばす錐体細胞におけるシナプス後電位であるとされる（その他にも低振幅であるが，脳幹における反応や，皮質下の反応も記録される）。神経細胞の電気活動は多様であり，複雑かつランダム様である為，互いの活動は電場として打ち消される。

しかしながら，配列方向の等しい多数の神経細胞群が同期して，一斉に活動した場合，頭皮上より記録が可能となる。その中でも，ある刺激や認知活動に関連した神経細胞が同期して活動することにより，ランダムな脳波から「事象に関連した電位変動」を観察することが可能である。

例えば，無音状態から音刺激を与えると，聴覚に関連した脳部位が反応し，一斉に活動する。この反応は振幅が小さいため，通常はランダムな波形に埋もれてしまう。しかし，後述する加算平均処理といった信号検出の手順によって反応の抽出が可能となる。得られた反応は聴覚刺激に関連した電位，という意味で聴覚性事象関連電位と呼ばれる。他にも光刺激に関連した電位を視覚性事象関連電位と呼ぶように，我々の脳波は外界からの刺激，あるいは個体内での認知活動に関連して，特異的に反応する。この脳波に見られる反応を総じて事象関連電位（**ERP：event related potential**）と呼ぶ。事象関連電位のうち，

特に外界からの刺激に、あるいはその刺激の物理的特性に依存して惹起される反応、すなわち外因性成分 (**exogenous component**) は誘発電位と呼ばれることが多い。一方、主に認知活動に依存して反映される反応は、内因性成分 (**endogenous component**) と呼ばれる。外因性と内因性に関して、成分の厳密な切り分けは困難であるため、本稿では総括的な呼び方として事象関連電位を用いる。個々の成分には一般的に呼称されている成分名を使用する。

事象関連電位は観察される部位や振幅 (陰性, 陽性), 潜時によって規定される。それらは、呈示される刺激の質や認知活動, 観察された母集団の特徴によって対応付けられ、成分として同定される。成分の同定には、実験条件と統制条件の波形を差分し、実験条件においてのみ操作された認知活動を反映する **ERP** 成分を、差分波形より同定する引き算法という方法もある。しかし、気を付けなければならないのは、実験操作、あるいは入力刺激や認知活動に対して、事象関連電位は一对一の対応をしないことがある。例えば、視覚刺激が入力されなくても、視覚誘発電位に類似した電位が惹起される。視覚誘発電位の一種であるラムダ反応は、ヒトが夢を見ている時にも観察されることが示されている。特異的という記述とは矛盾するようであるが、事象関連電位は異なる成分が重なり合って観察される事が多いため、成分の同定は慎重に行う必要がある。

2.2. 加算平均

ヒトの覚醒中の頭皮からは、基本的に **20 Hz** 帯域でランダム様の β 波が観察される。事象関連電位は、 β 波に埋没する形で惹起される。そこで、信号抽出のためには刺激と無関連のランダムノイズを除去しなければならない。事象に関連した活動は位相が同期する。すなわち、ある潜時における反応は、陰性方向か陽性方向に一定であるため、事象の開始時点をオンセットとして、数十回ほど波を加算すると、同期した反応は増強される。一方、ノイズは位相が揃わない、すなわち土がランダムに一樣であるため、オンセットで加算すると、減衰する。こうして得られた加算波形を、加算した回数によって平均する

処理が加算平均処理である。加算平均処理によって我々が扱うことのできる **ERP** 波形が抽出される。**ERP** の部位情報や振幅、あるいは潜時から、頭皮上分布や電流発生源が求められる。

2. 3. LORETA

頭皮上で得られる **ERP** から発生源を推定する方法にはいくつかあるが、その一つに **LORETA** がある。**LORETA** (**Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography**) とは **Pascual-Marqui, Michel and Lehmann (1994)** により考案された、脳内電気活動源の分布を三次元画像に表示する方法である。頭皮上で得られた脳波活動の発生源を、標準脳モデルである **Talairach space** (**Montreal Neurological Institute Center** 作成) に神経活動(同期化)の分布として重ね描きし、断層写真のように描写するものである。**LORETA** は、隣接するニューロン群の類似した活動が、頭皮上で得られる脳波であることを前提として、**Boxel** (三次元推定で用いられる立方体の単位) 間の変化量を最小に推定することが特徴である。したがって、正確な発生源の推定より、**low resolution** (約 **7 mm**) の空間解像度における、神経活動の広がりとして図示することが目的となる。

3. 聴覚情報の変化検出に関連した事象関連電位

事象関連電位には聴覚情報の変化検出に関連した成分が二つあることが明らかにされている。それらは外因性成分(誘発反応)と内因性成分とに分類され、前者は **N 1** (**N 100**) 成分、後者はミスマッチ陰性電位 (**MMN: mismatch negativity**) と呼ばれる。**N 1** 成分とは聴覚刺激が感覚器(耳、鼓膜)に到達してから約 **50–100 ms** の潜時で頭頂部優位で陰性に現れる、外因性の聴覚誘発電位である。一方、**MMN** は聴覚において特異的な、自動的な変化検出を反映した **ERP** 成分である。**MMN** は標準刺激の反復呈示中において、弁別可能な変化刺激の出現をオンセットとして、潜時 **100–200 ms** の陰性シフトと

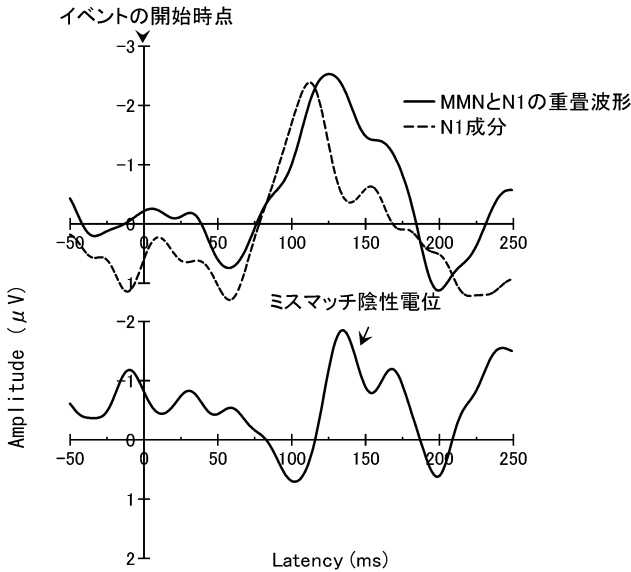


図1 前頭部より観察されたミスマッチ陰性電位の模式図。横軸がイベント開始前 50 ms から開始後 250 ms を示す。縦軸が振幅を示す。上段、実線が N 1 に重畳した MMN, 点線が N 1 である。下段は実線から点線の差分波形を示す。

して見られる。MMN は刺激に対して注意を向けていなくても、また心理的に変化に気付いていなくても、更に変化を無視するような課題を与えられても、惹起される。図 1 は N 1 と MMN の波形、及び、引き算によって得られたミスマッチ陰性電位の模式図を示す。なお、ERP を図示する場合、慣例的に上方を陰性、下方を陽性に示すことが多い。従って、潜時 100–150 ms にかけて、上方ヘシフトしている電位変動がミスマッチ陰性電位である。

通常、MMN は N 1 に重畳する形で観察され、(Scherg, Vajsar, & Picton, 1989; Lang et al., 1990) 純粋な内因性成分として観察するには、外因性成分 N 1 を引き算によって取り除くことが必要となり、明確な切り分けは困難である。

しかしながら、先行研究により N 1 と MMN は機能的、解剖的には独立した機能を反映していることが示されている (Näätänen, 1990, 1992)。以下に

Rinne (2001) による分類を基に、N1 と MMN の違いを記す。

まず、N1 は単一の刺激で惹起するが、MMN は先行する刺激系列によって形成される、ある種の文脈が必要である (Sams et al., 1985; Näätänen, Paavilainen, Alho, Reinikainen, & Sams, 1989; Korzyukov et al., 1999)。N1 は刺激の物理レベルでの変化を検出する一方、MMN は先行刺激からの刺激の逸脱の程度を検出する (Näätänen & Picton, 1987)。Saarinen, Paavilainen, Schoger, Tervaniemi, and Näätänen (1992) は上昇系列、及び下降系列の刺激系列を作成し、稀に系列を逆転させることで MMN が惹起することを示した。

次に、MMN は小さな変化に対しても有意に反応するが、N1 の振幅は物理的変化量がある程度多くないと有意に増強しない (Sams et al., 1985; Näätänen, 1992)。N1 は物理的な刺激強度や周波数次元の増加にしたがって振幅が増大するのに対して、MMN は微細な変化に対して感度が高いことが明らかになっている。

MMN は刺激の物理的変化量によって振幅が増減する。すなわち、先行刺激に対する相対的な変化量の絶対値に依存する (Näätänen, 1992)。しかし、N1 は刺激の物理量の増減に対し正の相関関係を示す (Rapin, Schimmel, Tourk, Krasnegor, & Pollack, 1966)。先行刺激に対して音量が低下するなど、エネルギーが小さい方向へ変化した場合、N1 の振幅は減少するが MMN は惹起され、MMN の振幅は変化の量の絶対値に相関する。

N1 と MMN は発生源が異なる (Scherg et al., 1989; Sams, Kaukoranta, Hämäläinen, & Näätänen, 1991; Csépe, Pantev, Hoke, Hampson, & Ross, 1992; Huotilainen et al., 1993; Tiitinen et al., 1993; Levänen, Ahonen, Hari, McEvoy, & Sams, 1996; Korzyukov et al., 1999; Rosburg, Haueisen, & Kreitschmann-Andermahr, 2004)。諸説あるが、N1 は潜時 100 ms ぐらいで頭頂優位であり、上側頭回 (STG: Supra temporal gyrus) が発生源であるとされる。一方、MMN は前頭優位で、STG、及び前部帯状皮質 (ACC: Anterior cingulate cortex) が発生源として示唆されている (図

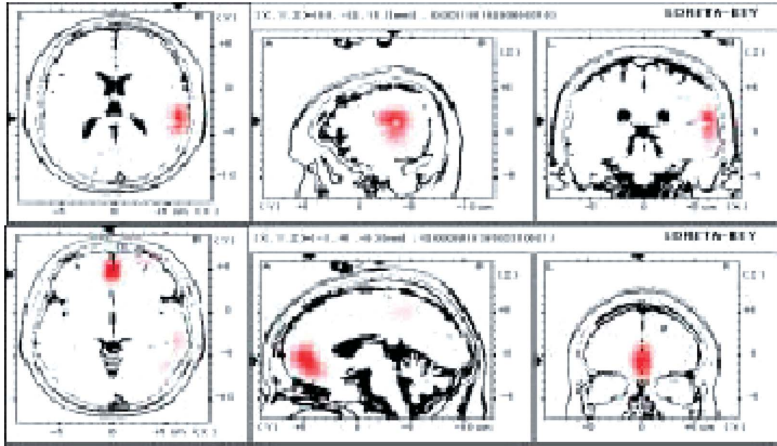


図2 LORETA法による、MMN発生源の分析（LORETA-KEYを使用）。赤色で示されている箇所が活動していることを示す。上段は潜時100ms付近の左上即頭回の活動を示す。下段は潜時150ms付近の前部帯状皮質の活動を示す。

2) (Waberski et al., 2001; Tamakoshi, & Yagi, 2005)。

最後に、N1は刺激の特徴次元にダイレクトに反応する刺激駆動型であるのに対し、MMNは表象レベルで統合されたイベントとして処理を行うことが挙げられる (Näätänen, & Winkler, 1999)。Näätänen, Paavilainen, Tiitinen, Jiang, and Alho (1993)は複雑な音列を呈示し、受動的に聞くブロックと弁別課題を交互に行った。学習フェーズの初期段階ではMMNは惹起しないが、試行が進むにつれ、MMNの惹起が見られる。このことから学習による長期記憶への情報の移行を示唆した。この結果より、MMNは情報のエンコーディング、もしくは長期記憶保持や言語習得 (Näätänen, 1999)の指標となる。

以上の分類より、より刺激駆動型な外因性成分であるN1に対し、MMNも同様に刺激特性によって変動するが、その成分はN1と比較すると、より高次な内因性処理が含まれていると考えられる。以前は内因性成分と外因性成分という呼び方で分類されたERP成分であるが、MMNはその両方の成分を

含むため、新たに自動的過程という呼び方が用いられた。

これら MMN 研究で得られた知見から、聴覚系における早い潜時の (200 ms 以下) 自動的な処理について、高次な処理が行われていることが示唆されている。以下、刺激入力後 200 ms という早いタイミングでの活動ではあるが、高次処理を反映する MMN 成分に関してより詳細に解説する。

4. MMN について

注意に関連した ERP 成分は、N 1 の増大という形で、最初に効果が発見された。選択的注意によって N 1 の振幅が増大するという発見である。その後の研究において、得られた波形から N 1 成分を引き算法によって取り除き、内因性成分を抽出した結果、処理陰性電位 (processing negativity) や、Nd 波 (negative difference wave) と呼ばれる、潜時 150 ms から 500 ms にかけての緩やかな陰性成分が示された。この分析により、N 1 の振幅増大ではなく、他の成分の重畳した結果であることが示唆された。これらの成分は選択的注意を反映する ERP 成分であるが、更なる分析で、課題に関連していない、すなわち、選択的注意に因らない、先行刺激との不一致 (mismatch) によって生じる ERP 成分が発見された。この成分が MMN である。

MMN は聴覚に特異的な、自動的な変化検出を反映する ERP 成分である、と前述した。「自動的な」という記述の説明として、MMN の惹起に注意の有無が拘らないということが挙げられる。刺激に対して、注意していなくても、あるいは課題に関連していない刺激変化に対しても MMN は反応するため、注意に因らない潜在的な処理を反映すると言える。因みに刺激に注意する事態では MMN 振幅は影響を受けず、MMN に重畳する形で注意に関連した成分である N 2 や P 3 が現れる。Kropotov et al. (1995) による側頭皮質から直接 MMN を計測した研究からも、MMN は聴覚に特有で注意とは独立して惹起することが確認された。さらに、注意に関連した ERP 成分である N 2, P 3 とは構造的に異なることが明らかになった。

MMN の主な発生部位は二箇所あり、一つは聴覚皮質、もう一つは前頭皮質とされている。前頭皮質の発生源であると予想される前部帯状皮質は、注意の切り替えに関連した部位であるとされる。MMN も、注意の切り替えに関連した成分である (Giard, Perrin, Pernier, & Bouchet, 1990)。これらの知見より、MMN の役割は、自動的な変化検出信号が聴覚皮質から発信され、前頭の注意を切り替える、トリガー機能であるという主張がある。

以上、簡単に MMN の特徴について述べた。総じて、MMN は入力された刺激と記憶痕跡との照合過程によって変化を検出する機能の反映であると言える。ここまで、MMN は外因性成分と内因性成分を両方含んだ、いわゆる自動的処理過程という位置付けから論じた。その中でも、MMN は非常に興味深い一面がある。それは刺激が欠落しても反応を示すというところである。欠落事態では、刺激は入力されないので、外因性の活動は反映されないはずである。すなわち、刺激欠落事態によって惹起された ERP 成分は N1 が重畳しない反応であり、純粋な MMN 成分のみが反映されるはずである。しかしながら、非注意状態における MMN の反応には制約があり、刺激呈示間隔 (SOA: stimulus onset asynchrony) が約 170 ms を超えて呈示されると MMN は惹起されないことが示されている (Tervaniemi, Saarinen, Paavilainen, Danilova, & Näätänen, 1994; Yabe et al., 1998)。加えて、玉越と八木 (2005) では刺激の持続時間 (duration) が 12.5 ms の条件では、SOA は 50 ms 以下でなければ明確な MMN は観察されなかった。

これらの結果より、MMN の特性を生かした、聴覚情報処理の時間的側面、入力情報の一時貯蔵の時間窓について研究が進められた。

5. TWI (temporal window of integration)

5.1. 聴覚情報の一時貯蔵

聴覚情報は日常生活において、時々刻々と変化して止め処無く入力される。我々の聴覚機構は環境音を知覚表象するにあたり、入力情報を、ある時間範囲

で区切りをつけ、「object」というまとまった情報として処理する必要がある。そのため、**temporal window of integration (TWI)** と呼ばれる一時貯蔵庫 (**buffer**) に蓄えてから、まとめられた情報を処理しているという説がある。TWI には長短 2 種類あり、一つは短い時間窓 (20~50 ms 程度) を 1 単位でまとめる「**short window**」と、今ひとつは **short window** をさらに 200 ms 程度でまとめる「**long window**」があると予測されている。この仮説は、**multiple look model** と呼ばれ、様々な入力情報をそれぞれの次元で **short window** に蓄え、並列的に処理する。さらに **short window** の情報はベルトコンベアーさながらに運ばれて、さらに大きな **long window** に **short window** の情報をまとめて、**object** として処理することを意味する (Viemeister, & Wakefield, 1991)。

5. 2. long window

long window に関する研究に用いられる指標として MMN がある (Näätänen, 1990; Yabe et al., 1998; Winkler et al., 2003)。欠落刺激における MMN は、SOA が約 170 ms 以下でなければ惹起されないことを前述した (Yabe et al., 1998)。Tervaniemi et al. (1994) は **tone pair** の二音目が欠落した場合、SOA が 140 ms 以内でなければ MMN を惹起しないことを発見した。Takegata, Roggia, and Winkler (2005) は 2 音により音列パターンを形成する **tone pair** を用いて、先行刺激、後続刺激をそれぞれ変化させた場合の MMN の振る舞いについて、刺激間隔 (ISI: **inter stimulus interval**) を操作し検討した。結果は ISI が 400 ms の条件では先行、後続、それぞれの刺激に対して MMN が惹起されていたが、ISI が 220 ms で呈示された条件では、先行、後続両方の刺激が変化したにも関わらず、MMN は一つのみ観察された。これらの TWI の研究における 200 ms 前後の情報のまとまりは、「**single unit**」と呼ばれることもある。

これらの研究から、**long window** は 140–200 ms であると示唆されている (Yabe et al., 1998; Yabe et al., 2001; Atienza et al., 2003)。さらに、音

楽訓練により、**long window** が長くなることが報告されている (Rüsseler, Altenmüller, Nager, Kohlmetz, & Munte, 2001)。

日常生活における **long window** の **duration** は、例えば、会話に用いる音素が約 **200 ms** 程度であるところからも、その程度であると予想される。TWI の **buffer** 的機能と関連して、Näätänen (1995) は **long window** を表象形成にかかる時間であると示唆している。

5.3. short window

short window に関して、行動指標による研究から、その **duration** が示唆されている。時間弁別課題において刺激 **duration** が **16 ms** 以上になると、音高として知覚され、課題が困難に成ることが知られている (Moore, 1989)。

クリック様の刺激や **tone burst**, **AM** 変調波など、刺激を繰り返して示した場合には、**SOA** が約 **25 ms** を超えると断続音として知覚されるが、**SOA** が約 **25 ms** 以下となると、もはや一つ一つの刺激としてではなく、それぞれが繋がった連続音として知覚される (Pressnitzer, Patterson, & Krumbholz, 2001; Krumbholz, Patterson, & Pressnitzer, 2000; 玉越・八木, 2005)。玉越と八木 (2005) は行動指標の生理学的裏づけとして、連続音として知覚される **SOA** と断続音として知覚される **SOA** を独立変数とし、それら刺激系列中に刺激欠落事態を挿入し、欠落時における **ERP** を分析した。結果、**100 ms** を超える **SOA** では明確な **MMN** は惹起されなかった。理由は刺激 **duration** が **short window** より短かったためであると考えられる。一方、**SOA 50 ms** 以下の刺激系列では欠落事態に対して、**MMN** が観察された。この結果は先行研究と同様の結果である。さらに刺激が連続音として知覚される、**25 ms** 未満の刺激系列における欠落事態に対する反応は、**MMN** に先行して聴覚誘発電位 **N1** が **MMN** に重畳する形で惹起した。これは刺激の欠落によって惹起された内因性成分である **MMN** に、連続音に挿入された **gap** (区切れ) という刺激における物理的な変化、すなわち外因性成分が重畳した結果であると推察された。以上の行動指標と行動指標に関連した生理反応の研究結果より、

short window の **duration** は約 **25 ms** であると結論付けられる。これは我々が日常会話に用いる音素のうち、子音部分の長さに相当する。

5. 4. TWI 研究の最近の動向

TWI 研究に限らず、近年は脳波分析全般において γ 帯域活動が注目されている。 γ 帯域は、**40 Hz** 前後のノイズとして事象関連電位を抽出する際に削除されたデータである。しかし信号解析の手法が発達するにつれ、事象に関連して、この γ 帯域の信号が増減することが示されつつある。そこから大脳皮質は **40 Hz** のクロック信号、あるいは自発神経発火の利用によって情報を伝達していることが示唆されている。注目したいのは **40 Hz** とは **1 s** に **40** 回振幅が増減する周波であるが、時間に換算すると **25 ms** の周期性を持った波と言える。周期 **25 ms** の長さは聴覚情報処理における **short window** と一致する。この一致により、**multiple look model** における **objective** な情報の転送を、神経的に実装していることが予想される。

Yabe et al. (2005) は、クリック刺激を用いて、**SOA 120 ms** と **SOA 170 ms** 条件における刺激欠落による **MMN** の振る舞いと γ 帯域活動を比較検討した。結果、**MMN** は **SOA 120 ms** 条件における欠落事態にのみ惹起した。しかし、 γ 帯域活動は両条件とも、欠落事態ではなく、クリック刺激に続いて観察された。以上の結果より、**long window** における処理機能について、**MMN** と γ 帯域活動の反映は乖離していると結論付けた。

一方、玉越と八木 (2006) による実験では、**SOA 25 ms** 呈示における刺激欠落事態の **MMN** と γ 帯域活動の関連を調べた。**SOA 25 ms** は周波数に換算すると **40 Hz** と一致するので、この実験における γ 帯域活動は刺激に同期した反応である。結果、刺激欠落において、**MMN** は有意に惹起された。また、**MMN** のシフトに先立って、 γ 帯域活動の有意な減少が観察された。以上の結果より、刺激に同期した γ 帯域活動と、**MMN** の振る舞いは関連していることが示唆された。しかし、 γ 帯域活動の反応は欠落後 **100 ms** 付近で完了するのに対し、**MMN** の反応は潜時 **100–200 ms** で顕著であったことから、

反映する機能は乖離している可能性が示された。

これらの結果より、大脳皮質における情報の転送と TWI の **short window**, 及び γ 帯域脳波が関連している可能性があることが示唆される。これらを明らかにするためには、神経生理学的な手法による、より詳細な検討、もしくは知見の応用が必要である。

6. まとめ、今後の展望

本稿では、**MMN** を指標とした、ヒトの聴覚情報処理における自動的過程、特に時間的側面について解説した。時間的側面に関する研究は、ヒトの言語機能の解明や、作動記憶 (**working memory**) における時間的側面とも密接な関連があると考えられる。**MMN** は自動的過程を反映することから、時間的側面に関する研究以外にも様々な場面で用いられる。例えば、臨床場面における、昏睡状態のモニターや新生児の聴力に関する診断にも用いられる。また、入眠期や睡眠状態における聴覚情報処理に関する研究においても、有用な指標となる。一方で、脳電位を指標とした研究は一概に万能とは言えない。脳電位を調べるだけでは、ヒトの心の全てはわからない。しかしながら、状況や対象によって脳電位は、ヒトの心の働きを知る上で強力な指標となる。特に本稿で論じた 1 秒の半分を下回る、ヒトの自動的な反応に関しては、非常に有効な指標となる。

本稿で扱った研究は基礎研究が多いが、5. 4. で述べた γ 帯域活動との関連は、ヒトの高次認知機能を解明する上で、近年では非常に注目されている。今後、他領域の研究との連携によって、生理学的知見の心理学的意義や、心理学モデルの神経生理学的妥当性を探っていく必要がある。そこから、近い将来、理工学分野へ貢献されること、さらに注意や意識などの総合的な心理が解明されることが期待される。

謝辞

私立大学学術研究高度化推進事業の学術フロンティア推進事業，先端技術による応用心理科学研究の支援を受けた。

References

- Atienza, M., Cantero, J. L., Grau, C., Gomez, C., Dominguez-Marin, E., & Escera, C. (2003). Effects of temporal encoding on auditory object formation: a mismatch negativity study. *Cognitive Brain Research*, *16*, 359–371.
- Giard, H. M., Perrin, F., Pernier, J., & Bouchet, P. (1990). Brain generators implicated in the processing of auditory stimulus deviance: A topographic event-related potential study. *Psychophysiology*, *27*, 627–640.
- Csépe, V., Pantev, C., Hoke, M., Hampson, S., & Ross, B. (1992). Evoked magnetic responses of the human auditory cortex to minor pitch changes: localization of the mismatch field. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, *84*, 538–48.
- Huotilainen, M., Ilmoniemi, R. J., Lavikainen, J., Tiitinen, H., Alho, K., Sinkkonen, J., et al. (1993). Interaction between representations of different features of auditory sensory memory. *NeuroReport*, *4*, 1279–81.
- Korzyukov, O., Alho, K., Kujala, A., Gumenyuk, V., Ilmoniemi, R. J., Virtanen, J., et al. (1999). Electromagnetic responses of the human auditory cortex generated by sensory-memory based processing of tone-frequency changes. *Neuroscience Letters*, *276*, 169–172.
- Kropotov, J. D., Näätänen, R., Sevostianov, A. V., Alho, K., Reinilainen, K., & Kropotova, O. V. (1995). Mismatch negativity to auditory stimulus change recorded directly from the human temporal cortex. *Psychophysiology*, *32*, 418–422.
- Krumbholz, K., Patterson, R. D., & Pressnitzer, D. (2000). The lower limit of pitch as determined by rate discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *108*, 1170–1180.
- Lang, A. H., Nyrke, T., Ek, M., Aaltonen, O., Raimo, I., & Näätänen, R. (1990). Pitch discrimination performance and auditive event-related potentials. In: *Psychophysiological brain research. Brunia CHM, Gaillard AWK and Kok A. Tilburg, Tilburg University Press.*
- Levänen, S., Ahonen, A., Hari, R., McEvoy, L., & Sams, M. (1996). Deviant auditory stimuli activate human left and right auditory cortex differently. *Cerebral Cortex*, *6*, 288–96.

- Moore, B. C. J. (1989). *An Introduction to the Psychology of Hearing*. 3 ed ed. London: Academic Press Limited. (ムーア B. C. J. 大串健吾・山田真司・倉片憲治・上田和夫・岡田 斉 (訳) (1994). 聴覚心理学概論 東京: 誠信書房)
- Näätänen, R. (1990). The role of attention in auditory information processing as revealed by event-related potentials and other brain measures of cognitive function. *The Behavioral and Brain Sciences*, 13, 201–288.
- Näätänen, R. (1992). Attention and Brain Function. *Hillsdale, NJ, Erlbaum*.
- Naatanen, R. (1995). The mismatch negativity: a powerful tool for cognitive neuroscience. *Ear Hear*, 16, 6–18.
- Näätänen, R. (1999). The perception of speech sounds by the human brain as reflected by the mismatch negativity (MMN) and its magnetic equivalent (MMNm). *Psychophysiology*, 38, 1–21.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Alho, K., Reinikainen, K., & Sams, M. (1989). Do event-related potentials reveal the mechanism of the auditory sensory memory in the human brain? *Neuroscience Letters*, 98, 217–221.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Tiitinen, H., Jiang, D., & Alho, K. (1993). Attention and mismatch negativity. *Psychophysiology*, 30, 436–50.
- Näätänen, R., & Picton, T. W. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24, 375–425.
- Näätänen, R., & Winkler, I. (1999). The concept of auditory stimulus representation in cognitive neuroscience. *Psychological Bulletin*, 125, 826–859.
- Pascual-Marqui, R. D., Michel, C. M., & Lehmann, D. (1994). Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *International Journal of Psychophysiology*, 18, 49–65.
- Pressnitzer, D., Patterson, R. D., & Krumbholz, K. (2001). The lower limit of melodic pitch. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109, 2074–2084.
- Rapin, I., Schimmel, H., Tourk, L. M., Krasnegor, N. A., & Pollack, C. (1966). Evoked potentials to clicks and tones of varying intensity in waking adults. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 21, 335–344.
- Rinne, T. (2001). *Human cortical functions in auditory change detection evaluated with multiple brain research methods*. Unpublished doctoral dissertation, University of Helsinki, Finland.
- Rosburg, T., Haueisen, J., & Kreitschmann-Andermahr, I. (2004). The dipole location shift within the auditory evoked neuromagnetic field components N100 m and mismatch negativity (MMNm). *Clinical Neurophysiology*, 115, 906–

913.

- Rüsseler, J., Altenmüller, E., Nager, W., Kohlmetz, C., & Munte, T. F. (2001). Event-related brain potentials to sound omissions differ in musicians and non-musicians. *Neuroscience Letters*, 308, 33–36
- Saarinen, J., Paavilainen, P., Schoger, E., Tervaniemi, M., & Näätänen, R. (1992). Representation of abstract attributes of auditory stimuli in the human brain. *NeuroReport*, 3, 1149–51.
- Sams, M., Hämäläinen, M., Antervo, A., Kaukoranta, E., Reinikainen, K., & Hari, R. (1985). Cerebral neuromagnetic responses evoked by short auditory stimuli. *Electroencephalography & Clinical Neurophysiology*, 61, 254–266.
- Sams, M., Kaukoranta, E., Hämäläinen, M., & Näätänen, R. (1991). Cortical activity elicited by changes in auditory stimuli: different sources for the magnetic N 100 m and mismatch responses. *Psychophysiology*, 28, 21–9.
- Scherg, M., Vajsar, J., & Picton, T. W. (1989). A source analysis of the late human auditory evoked potentials. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1, 336–355.
- Takegata, R., Roggia, S. M., & Winkler, I. (2005). Effects of temporal grouping on the memory representation of inter-tone relationships. *Biological Psychology*, 68, 41–60.
- Tamakoshi, S., & Yagi, A. (2005). Relationship Between the Mismatch Negativity and Neuronal Coding in Rhythm Change [Abstract]. *IFIP 4th International Conference on Entertainment Computing, Extended Abstracts of Demos & Posters*, 33–36.
- 玉越勢治・八木昭宏 (2005, 5). 聴覚情報処理の **temporal coding** に関する検討. 第 23 回日本生理心理学会大会, 愛知学院大学.
- 玉越勢治・八木昭宏 (2006, 5). EEG を指標とした聴覚情報処理における時間一周波数的検討. 第 24 回日本生理心理学会大会, 広島大学.
- Tervaniemi, M., Saarinen, J., Paavilainen, P., Danilova, N., & Naatanen, R. (1994). Temporal integration of auditory information in sensory memory as reflected by the mismatch negativity. *Biological Psychology*, 38, 157–167.
- Tiitinen, H., Alho, K., Huotilainen, M., Ilmoniemi, R. J., Simola, J., & Näätänen, R. (1993). Tonotopic auditory cortex and the magnetoencephalographic (MEG) equivalent of the mismatch negativity. *Psychophysiology*, 30, 537–40.
- Viemeister, N. F., & Wakefield, G. H. (1991). Temporal integration and multiple looks. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 90, 858–865.
- Waberski, T. D., Kreitschmann-Andermahr, I., Kawohl, W., Darvas, F., Ryang, Y., Gobbele, R., et al. (2001). Spatio-temporal source imaging reveals sub-

- components of the human auditory mismatch negativity in the cingulum and right inferior temporal gyrus. *Neuroscience letters*, 308, 107–110.
- Winkler, I., Sussman, E., Tervaniemi, M., Horvath, J., Ritter, W., & Näätänen, R. (2003). Preattentive auditory context effects. *Cognitive, affective & behavioral neuroscience*, 3, 57–77.
- Yabe, H., Tervaniemi, M., Sinkkonen, J., Huottilainen, M., Ilmoniemi, R. J., & Näätänen, R. (1998). Temporal window of integration of auditory information in the human brain. *Psychophysiology*, 35, 615–619.
- Yabe, H., Sutoh, T., Matsuoka, T., Asai, R., Hiruma, T., Sato, Y., et al. (2005). Transient gamma-band response is dissociated from sensory memory as reflected by MMN. *Neuroscience Letters*, 380, 80–82.
- Yabe, H., Winkler, I., Czigler, I., Koyama, S., Kakigi, R., Sutoh, T., et al. (2001). Organizing sound sequences in the human brain: the interplay of auditory streaming and temporal integration. *Brain Research*, 897, 222–227.

——玉越勢治 大学院文学研究科博士課程後期課程——

——八木昭宏 文学部教授——